



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 197 55 361 A 1**

⑤1 Int. Cl.⁶:
H 04 B 10/18
G 02 B 6/10
H 02 J 17/00
G 08 C 23/06

②1 Aktenzeichen: 197 55 361.3
②2 Anmeldetag: 12. 12. 97
④3 Offenlegungstag: 18. 6. 98

DE 197 55 361 A 1

③0 Unionspriorität:
763381 13. 12. 96 US

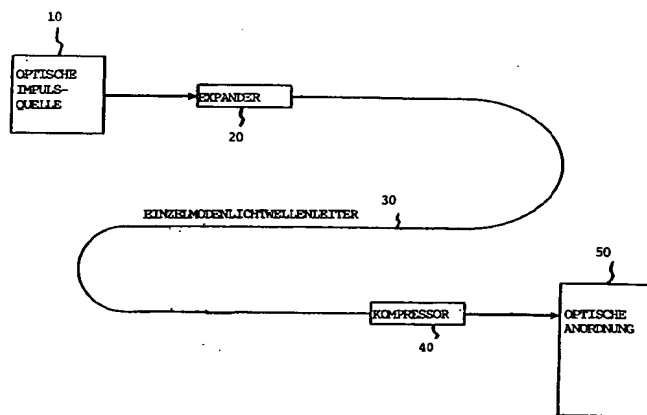
⑦1 Anmelder:
IMRA America, Inc., Ann Arbor, Mich., US

⑦4 Vertreter:
Tiedtke, Bühling, Kinne & Partner, 80336 München

⑦2 Erfinder:
Stock, Michelle L., Dr., Ann Arbor, Mich., US;
Bendett, Mark P., Dr., Ann Arbor, Mich., US;
Galvanauskas, Almantas, Dr., Ann Arbor, Mich., US;
Harter, Donald J., Dr., Ann Arbor, Mich., US; Sucha,
Gregg D., Dr., Manchester, Mich., US

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

- ⑤4 Vorrichtung und Verfahren zum Zuführen dispersionskompensierter ultrakurzer optischer Impulse mit hoher Spitzenleistung
- ⑤7 Eine Vorrichtung und ein Verfahren zum Zuführen eines Impulses mit hoher Spitzenleistung zu einer optischen Vorrichtung über einen Lichtwellenleiter umfaßt eine ultrakurz gepulste Laserquelle (10) zum Erzeugen ultrakurzer optischer Impulse mit hoher Spitzenleistung. Vor der Übertragung der optischen Impulse über einen Zuführungslichtwellenleiter (30) wird die Impulsbreite der optischen Impulse expandiert, wobei gechirpte optische Impulse mit geringer Spitzenleistung erzeugt werden. Die expandierten Impulse werden über den Lichtwellenleiter (30) zum Zuführen der Impulse zu einer ultrakurzen optischen Vorrichtung (50) übertragen. Der Lichtwellenleiter (30) und/oder eine an das Ende des Lichtwellenleiters gekoppelte Ausgabereinheit bewirken eine Dispersion, die die durch die gepulste Laserquelle (10) und einen Expander (20) hervorgerufene Dispersion kompensiert, und führen der optischen Vorrichtung (50) einen rekomprimierten optischen Impuls zu. Das Lichtwellenleiterzuführungssystem führt vorzugsweise eine Vorkompensation der durch die optischen Komponenten der optischen Vorrichtung (50) bewirkten Dispersion durch, so daß die optischen Impulse an einem betrachteten Punkt innerhalb der optischen Vorrichtung (50), wie beispielsweise an einem Muster oder an einem Detektor, vollständig rekomprimiert sind. Das Lichtwellenleiterzuführungssystem kann einen Frequenzumsetzer entweder vor oder nach dem Zuführungslichtwellenleiter ...



DE 197 55 361 A 1

Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf ein optisches Impulszuführsystem für verschiedene Arten optischer Vorrichtungen, wie beispielsweise ein ultrakurze Impulse mit hoher Impulsleistung erforderndes optisches Meßsystem. Im einzelnen bezieht sich die vorliegende Erfindung auf ein optisches Impulsausgabesystem, in dem ein Lichtwellenleiter eingesetzt ist und das ein Kompensieren verschiedener innerhalb des Systems auftretender Dispersionseffekte ermöglicht, um Impulse mit hoher Spitzenleistung auszugeben.

Bekannte Impulsquellen für ultrakurze optische Impulse können derzeit Impulse mit Impulsbreiten im Pikosekunden- und Sub-Pikosekundenbereich bei verschiedenen Wellenlängen, Impulsenergien und Wiederholraten bis in den GHz-Bereich erzeugen. Solche optischen Impulsquellen werden im allgemeinen in Meß- und Bilderzeugungsanwendungen eingesetzt, in denen eine Zeitfensterung oder Anregung durch eine hohe Spitzenleistung oder Intensität erforderlich ist. Ultrakurze optische Impulse ermöglichen sowohl eine hohe räumliche und zeitliche Auflösung als auch für die Anregung bestimmter nichtlinearer Vorgänge (wie beispielsweise die Anregung eines multiphotonenfluoreszierenden Mediums) erforderlich hohe Spitzenleistungen. Diese Möglichkeiten werden in Anwendungen wie beispielsweise biologische und medizinische Bildgebung, Meßtechnik, Terahertzherzeugung, lichtleitender und elektrooptischer Abtastung und optischer Zeit-Bezirk-Reflexmessung eingesetzt.

Bekannte Verfahren zum Ausgeben ultrakurzer optischer Impulse an eine zu testende Vorrichtung oder einen Meßpunkt umfassen die Verwendung optischer Komponenten wie beispielsweise Spiegel, Linsen, Lichtwellenleiter, Strahlteiler und dichroitische Elemente. Ein aus solchen Elementen bestehendes Ausgabesystem durch laufende ultrakurze optische Impulse erfahren sowohl eine Änderung ihrer Spitzenleistung als auch Verzerrungen ihrer zeitlichen Form. Diese Verzerrungen können zu einer verringerten Auflösung oder einer Verschlechterung des Signal-Rausch-Verhältnisses führen. Die Veränderungen der Spitzenleistung und der zeitlichen Form eines sich durch ein optisches System ausbreitenden ultrakurzen optischen Impulses werden durch Verluste und Dispersion hervorgerufen. Darüber hinaus führen die bei hohen Spitzenleistung auftretenden nichtlinearen Effekte zu einer Verzerrung des optischen Impulses.

Ein ultrakurzer optischer Impuls ist aus einem gewissen Bereich optischer Frequenzen (oder Wellenlängen) zusammengesetzt, die seine Bandbreite ergeben. Bei dem kürzesten Impuls einer gegebenen Bandbreite (bandbreitenbegrenzter Impuls) sind alle seine Frequenzkomponenten zeitlich optimal überlagert. Bei der Ausbreitung durch ein System erfahren die verschiedenen Wellenlängenkomponenten eines Impulses unterschiedliche Verzögerungen. Diese unterschiedlichen Verzögerungen verursachen die vorgenannte Verzerrung der zeitlichen Form und Änderung der Spitzenleistung eines ultrakurzen optischen Impulses. Das Ergebnis ist ein frequenzchirpmodulierter Impuls, wobei die augenblickliche Frequenz entlang des Impulses eine Funktion der Zeit ist.

Eine Ausbreitung durch ein zur Ausgabe optischer Signale verwendetes lichtdurchlässiges Material, wie beispielsweise Glas, führt im allgemeinen zu sehr geringen Verlusten. Aufgrund des frequenzabhängigen Brechungsindex $n(v)$ des Mediums, der die Ausbreitungsgeschwindigkeit v des optischen Signals durch die Beziehung $v = c/n(v)$ bestimmt, wobei c die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum

kennzeichnet, breiten sich verschiedene Wellenlängen λ in dem Material mit unterschiedlicher Geschwindigkeit aus, wobei die Beziehung zwischen der Wellenlänge und der Frequenz durch $\lambda = c/v$ gegeben ist. Dieser Effekt wird als chromatische Dispersion bezeichnet. Die Wechselwirkung zwischen einem gepulsten optischen Signal und einem solchen Material kann aufgrund der Gruppengeschwindigkeitsdispersion (GVD) zu einer Impulsverbreiterung führen. Dieser Effekt führt dazu, daß die niedrigeren Frequenzkomponenten und die höheren Frequenzkomponenten der Bandbreite nach dem Durchlaufen des Dispersionsmediums zu unterschiedlichen Zeitpunkten ankommen. In Abhängigkeit des Vorzeichens der Dispersion kann sich die Wirkung ergeben, daß die niedrigeren Frequenzkomponenten früher oder später ankommen. In Glas ist das Vorzeichen der Dispersion für solche Wellenlängen positiv, die kürzer als die Nulldispersionswellenlänge (ungefähr 1300 nm) sind, wobei sich höhere Frequenzen des optischen Impulses langsamer ausbreiten als niedrigere Frequenzen. Oberhalb der Nulldispersionswellenlänge ist das Vorzeichen der Dispersion negativ, wobei sich niedrigere Frequenzen des optischen Impulses langsamer ausbreiten als höhere Frequenzen. Daher führt jedes optische Element, über das der ultrakurze optische Impuls übertragen wird, zu einer potentiellen Verzerrungswirkung.

Eine Dispersionsmanipulation ist durch einige bekannte optische Elemente und Systeme möglich. Diese umfassen Glasprismen, Beugungsgitter, Fasergitter und Lichtwellenleiter. Diese Elemente ermöglichen sowohl das Erreichen beider Dispersionsvorzeichen bei jeder Wellenlänge als auch das Kompensieren eines Frequenzchirps. Glasprismenpaare können zum Aufbau einer Dispersionsverzögerungsleitung verwendet werden, wobei unterschiedlichen Dispersionsgrade durch Verändern der Distanz zwischen den beiden Prismen erzielt werden können. In ähnlicher Weise sind unterschiedliche Grade sowohl positiver als auch negativer Dispersion erreichbar, wenn entweder reflektierende oder lichtdurchlässige Beugungsgitter verwendet werden. Fasergitter sind gechirpte Bragg-Gitter, die in den Kern eines Lichtwellenleiters eingeschrieben wurden. In einem gechirpten Fasergitter erfolgt die Dispersion durch Reflektieren unterschiedlicher Wellenlängen an unterschiedlichen räumlichen Positionen, wobei unterschiedlichen Wellenlängenkomponenten unterschiedliche Zeitverschiebungen hinzugefügt werden. Spezialfasern können für Wellenlängen hergestellt werden, die länger als ungefähr 1300 nm sind. Bei diesen Fasern wird eine Wellenleiterdispersion in Verbindung mit einer Materialdispersion zum Erzielen einer gewünschten positiven, negativen oder nahe bei Null befindlichen Dispersion verwendet.

Unter den bekannten Optiken für eine Strahlsteuerung in einem optischen System stellen Lichtwellenleiter ein bevorzugtes Ausgabeverfahren in praktischen Systemen dar, insbesondere wenn die Laserquelle unhandlich ist. Lichtwellenleiter ermöglichen durch ein stabiles Vorabausrichten der Komponenten eine erhöhte Zuverlässigkeit und Robustheit. Durch das mögliche Einschließen des Laserlichts kann die Laserquelle bei der optischen Lichtausgabe in verschiedensten von typischen Laserlaboratorien abweichenden Umgebungen angeordnet werden, wobei die Lichtquelle auch an einer geeigneten Stellen bezüglich des übrigen Systems angeordnet werden kann, was zu einer erhöhten Flexibilität beim Systementwurf führt. Darüber hinaus kann der Lichtwellenleiter ohne Stören der Ausrichtung zwischen der Laserquelle und der optischen Vorrichtung abgetrennt werden; somit können die beiden Systeme vorab ausgerichtet und in verschiedenen Behältern getrennt geliefert werden. Wie vorstehend beschrieben, können Lichtwellenleiter jedoch zu ei-

ner Verzerrung des Zeitprofils ultrakurzer optischer Impulse führen.

Lichtwellenleiter können als Einzelmodellichtwellenleiter (Monomodelichtwellenleiter, zum Ausbreiten eines einzelnen räumlichen Moden) oder als Mehrfachmodellichtwellenleiter (Multimodelichtwellenleiter, zum Ausbreiten mehrerer räumlicher Moden) für eine Wellenlänge λ gekennzeichnet werden. Im Falle des Monomodelichtwellenleiters ergeben sich bei der Lichtwellenleiterimpulsausbreitung die folgenden Eigenschaften: frequenzabhängige Verluste, eine zur Impulsverbreiterung führende Materialdispersion und eine Wellenleiterdispersion. An dem "Nulldispersions"-Punkt, in dem die Materialdispersion ihr Vorzeichen umkehrt (beispielsweise bei ungefähr 1300 nm in Standardtelekommunikationslichtwellenleitern), können sich Impulse ohne merkliche Verbreiterung ausbreiten. Mit verringerter Materialdispersionswirkung wird jedoch die durch die Modenbegrenzung an der Kern-Mantel-Grenzfläche hervorgerufene Wellenleiterdispersion spürbarer. In Multimodelichtwellenleitern führt das Hinzufügen vieler räumlicher Moden, die zu einer weiteren zeitlichen Verbreiterung führen können, zu einem komplexeren Verhalten. Der Multimodelichtwellenleiter ist allerdings aufgrund seiner höheren Toleranz hinsichtlich einer Fehlausrichtung für eine Vielzahl von Anwendungen interessant.

In optischen Langstreckenlichtwellenleitertelecommunicationssystemen tritt das Problem auf, daß hohe Bitfehlerraten aufgrund der Verbreiterung optischer Signalimpulse längs der langen optischen Lichtwellenleiterzuführstrecken auftreten. Diesem Problem wurde durch verschiedene Verfahren begegnet, wie beispielsweise Dispersionskompensation unter Verwendung speziell ausgebildeter Lichtwellenleiter, Vorabchirpen der Impulse, wobei in jedem dieser Verfahren optische Fasergitter verwendet werden können. Die Spitzenleistungen der in diesen Systemen verwendeten Signale befinden sich jedoch unterhalb des Einsetzens nichtlinearer Effekte; diese Systeme haben nicht das Zuführen von Impulsen hoher Spitzenleistung (eine hohe Spitzenleistung wird hier als > 1 kW definiert) über den Lichtwellenleiter zum Ziel.

Ein Zwei-Photonen-Lasermikroskop stellt ein das Zuführen optimierter Impulsbreiten erforderndes System dar. Wie durch Denk u. a. in der US-Patentschrift 5,034,613 offenbart ist, umfaßt ein solches System ein Laserabtastmikroskop, ein Fluorophor mit geeigneter Abstrahlung einer Langwellenbeleuchtung (Rot oder Infrarot) beispielsweise als ein Fleck, eine Pikosekunden- oder Subpikosekundenlasersquelle mit geeigneter Wellenlänge, einen Detektor für die Abstrahlung des Fluorophors und eine durch einen Computer bereitgestellte Signalverarbeitung. Obwohl mehrere verschiedene Quellen zum Bereitstellen ultrakurzer Impulse verwendet wurden, wie beispielsweise Ti:Saphir und Cr:LiSAF, erfolgt die Ausgabe der Impulse mit hoher Spitzenleistung im "freien Raum". In einem solchen System, über das durch M. Müller u. a. in "Measurement of Femtosecond Pulses in the Focal Point of a High-Numerical-Aperture Lens by Two-Photon Absorption", Optics Letters, Vol. 20, No. 9 (1995) berichtet wird, wurde festgestellt, daß das Mikroskopobjektiv die auf die Linse einfallenden Impulse verzerrt, wodurch die Impulse merklich verbreitert werden.

Ein weiteres Beispiel für eine optimierte Impulse erfordernde Anwendung ist die optische Meßtechnik. Bei der optischen Meßtechnik erfolgt die Messung eines physikalischen Parameters in nichtzerstörender kontaktfreier Weise unter Verwendung einer optischen Meßvorrichtung. Die Vorrichtung umfaßt eine optische Impulsquelle, einen Ausgabemechanismus und eine Sonde oder ein Fühler die in solcher Weise eingeführt werden, daß die Lichtquelle ein zu

messendes Objekt beleuchtet und dessen Reflektion zur Signalverarbeitung eingefangen wird. Eine geeignete Möglichkeit zum Zuführen des Lichts von der Impulsquelle ist das Bereitstellen des Lichts über einen in die Meßsonde integrierten Lichtwellenleiter. Die Sonde kann dann so aufgebaut sein, daß ein geeignetes Anbringen in einem Meßsystem ermöglicht wird, so daß die Sonde annähernd mit der Meßprobe in Kontakt gebracht wird. Bei diesem System ist die Auflösung abhängig vom Erzielen des (kürzesten) Impulses mit hoher Spitzenleistung an dem Meßpunkt, der sich in dem Verdopplungskristall eines in dem Meßsystem befindlichen Autokorrelators oder Kreuzkorrelators befindet. Allerdings führt die Lichtwellenleiterzuführung allein zu keinem optimalen Zustand für das Zuführen des kürzesten Impulses zu diesem Meßpunkt.

In anderen Systemen wurde eine Form der Lichtwellenleiterzuführung modenstarrer oder modenverriegelter Impulse zu einer zu untersuchenden Meßprobe eingesetzt. Insbesondere wird in der internationalen Anmeldung Nr. PCT/US92/03536, Huang u. a. ein System für eine optische Kohärenz-Bezirk-Reflexmessung beschrieben, die eine Lichtwellenleiterzuführung einer Quelle mit kurzer Kohärenzlänge zu der zu messenden Probe umfaßt. Eine solche Quelle kann entweder eine breitbandige Superlumineszenzquelle oder eine ultrakurze Impulse abgebende (und daher breitbandige) modenverriegelte Quelle sein. Bei dem Meßverfahren existiert ein Bezugspfad und ein Meßpfad, die als Interferometer aufgebaut sind (zum Erhalten der Meßinformation müssen die beiden Pfade eine optische Interferenz hervorrufen). Eine erforderliche Bedingung für das Auftreten dieser Interferenz besteht darin, daß die optischen Pfadlängen von der Quelle zu dem Bezugselement und von der Quelle zu der Meßprobe annähernd gleich sind, eine Bedingung die durch $L_{\text{ref}} - L_{\text{sample}} \sim L_{\text{coherence}}$ beschrieben wird, wobei L_{ref} die optische Pfadlänge von der Quelle zu dem Bezugselement, L_{sample} die optische Pfadlänge von der Quelle zu der Meßprobe und $L_{\text{coherence}}$ die Kohärenzlänge der optischen Quellen kennzeichnet. Diese Bedingung muß für alle Wellenlängen erfüllt sein. Hierbei ist festzustellen, daß ein anderes optisches Material mit bekannter, höherer GVD und kürzerer Länge zu dem kürzerem Arm hinzugefügt werden kann, um diese optischen Pfadlängen anzugleichen, falls die Länge des Lichtwellenleiters in einem Zweig des Systems kürzer ist als in dem anderen, beispielsweise für blaues Licht, wodurch die relative Länge als Funktion der Wellenlänge kompensiert wird. Die Kompensation erfolgt zum Sicherstellen, daß jede Wellenlängenkompente des breitbandigen Lichts die Endpunkte der beiden optischen Pfade zum gleichen Zeitpunkt erreicht (d. h. die kürzesten Wellenlängen, die mittleren Wellenlängen und die längsten Wellenlängen kommen zum gleichen Zeitpunkt an). Bei der Verwendung einer modenverriegelten Quelle brauchen die Impulsbreiten nicht kurz zu sein. Der Chirp ist allerdings bei den Impulsen eines jeden Pfades gleich.

In einem ähnlichen System, über das Bouma u. a. in "High Resolution Optical Coherence Tomographic Imaging Using a Modelocked Ti:Al₂O₃ Laser Source", Optics Letters, Vol. 20, No. 13 (1995) berichtet, erfolgt eine optische Coherence Tomografiebildgebung unter Verwendung eines modenverriegelten Cr:Forsterit-Lasers. Auch hier ist die optische Bandbreite des Lasers für das Bildgebungsverfahren von primärer Bedeutung. Daher wurde die begrenzte Bandbreite des Cr:Forsterits durch Verwendung des bekannten Verfahrens zum Erzeugen einer Bandbreite in Lichtwellenleitern unter Verwendung einer Eigenphasenmodulation erweitert. Somit wurde ein Lichtwellenleiter zwischen dem Ausgang des Lasers und dem Eingang des Bilderzeugungs-

systems hinzugefügt, wobei sich als zusätzlicher Vorteil eine vereinfachte Ausrichtung ergibt. Hier bestand jedoch nicht das Erfordernis oder die Absicht, der zu untersuchenden Meßprobe optimierte Impulsbreiten zuzuführen. Tatsächlich ist zum Erzielen der kürzesten Impulse normalerweise eine Eigenphasenmodulation unerwünscht.

Ein weiteres System, bei dem die Lichtwellenleiterzuführung vorteilhaft eingesetzt wird, wird durch Harris in der US-Patentschrift 5,120,953 beschrieben. Hierbei wird einer in einem Abtastkonfokalmikroskop befindlichen Meßprobe über einen Lichtwellenleiter Licht zugeführt und das an der Meßprobe erzeugte rückgestreute Signal in demselben Lichtwellenleiter zur Erfassung gesammelt. Der Lichtwellenleiter dient zum Vermeiden strikter Positionserfordernisse der Konfokalbildgebungsoptik im Strahlengang des Mikroskops und als räumliches Filter für den Eingangslichtmode und das rückgestreute Signallicht. In einem solchen System wird die Impulsbreite des Lichts nicht berücksichtigt, da eine Einzelphotonenfluoreszenz die Quelle des Signals darstellt, wobei die Fluoreszenz zur mittleren Leistung und nicht zur Intensität des auf die Meßprobe einfallenden Lichts proportional ist. Daher werden bei dieser Anwendung CW-Laser und keine Impulsquellen verwendet.

Bei einem optischen Meßsystem wie beispielsweise das Abtastkonfokalmikroskop ist insbesondere die Lichtwellenleiterzuführung vorteilhaft. In einem bestimmten Meßsystem kann eine ultraschnelle Lichtquelle über eine Zuführungsfaser an ein optisches System gekoppelt sein. Im Falle der Zwei-Photonen-Mikroskopie ist das Zuführen von Lichtimpulsen mit hoher Spitzenleistung und geringer Gesamtenergie zu der Meßprobe entscheidend. Die Laserintensität (d. h. W/cm^2) muß einen für das Fortschreiten der Zwei-Photonen-Absorption mit geeigneter Rate ausreichenden Betrag aufweisen. Oberhalb eines gewissen Energiepegels können die Impulse jedoch ein Fotobleichen verursachen und die Meßprobe möglicherweise beschädigen. Dementsprechend ist ein Meßsystem mit einer Ultrakurzimpulslichtquelle erforderlich, daß einen Impuls mit hoher Spitzenleistung, kurzer Dauer aber geringer Gesamtenergie zuführt.

Es ist Aufgabe der vorliegenden Erfindung eine Vorrichtung und ein Verfahren zum Zuführen von Impulsen mit hoher Spitzenleistung über einen Lichtwellenleiter zu einer optischen Vorrichtung bereitzustellen, wobei die Impulsform-eigenschaften der Impulse mit hoher Spitzenleistung in einem gewünschten Interaktionspunkt optimiert sind.

Eine weitere Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht darin, die in einer optischen Impulsquelle und/oder einem Zuführungslichtwellenleiter auftretenden Dispersionseffekte zu steuern, um die Dispersionseffekte in einer optischen Vorrichtung wie beispielsweise einem optischen Meßsystem zu kompensieren.

Eine weitere Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht darin, eine durch bei der Ausbreitung von Impulsen mit hoher Spitzenleistung über ein Lichtwellenleiterzuführungssystem entstehende nichtlineare Effekte verursachte Impulsverzerrung zu vermeiden.

Die vorgenannten Aufgaben werden gelöst durch eine Vorrichtung nach den Patentansprüchen 1, 20 und 21 bzw. durch ein Verfahren nach dem Patentanspruch 28.

Die vorliegende Erfindung umfaßt eine ultrakurz gepulste Laserquelle, die ultrakurze optische Impulse mit hoher Spitzenleistung erzeugt. Vor dem Aussenden der optischen Impulse über einen Lichtwellenleiter wird die Impulsbreite der optischen Impulse gedehnt, wobei gechirpte optische Impulse mit einer geringeren Spitzenleistung gebildet werden. Die Impulsverbreiterung kann innerhalb des Lasers oder durch eine getrennte Spreiz- oder Expandereinheit durchge-

führt werden. Ein direkt von der Laserquelle resultierender Chirp des optischen Impulses kann mit oder ohne weitere Dispersionsvorrichtungen (d. h. holografische Gitter, Lichtwellenleitergitter, metallische Gitter, Lichtwellenleiter, Speziallichtwellenleiter oder Prismen) verwendet werden.

Die gespreizten oder expandierten optischen Impulse werden über einen Lichtwellenleiter ausgesendet, der die Impulse einer ultrakurze optische Impulse mit hoher Spitzenleistung erfordernden optischen Vorrichtung zuführt. Da die Spitzenleistung der optischen Impulse durch das Expandieren der Impulsbreite verringert ist, werden die bei Impulsen mit hoher Spitzenleistung auftretenden nichtlinearen Effekte in Lichtwellenleitern vermieden. Der Lichtwellenleiter und/oder ein Impulskompressor führen eine Dispersion herbei, die die durch die gepulste Laserquelle und den Expander hervorgerufene Dispersion kompensiert, und führen der optischen Vorrichtung einen rekomprimierten optischen Impuls zu. Vorzugsweise führt das Lichtwellenleiterzuführungssystem eine Vorabkompensation der durch die optischen Komponenten innerhalb der optischen Vorrichtung herbeigeführten Dispersion durch, so daß die optischen Impulse an dem betrachteten Punkt innerhalb der optischen Vorrichtung vollständig rekomprimiert sind, wie beispielsweise an einer Meßprobe oder an einem Detektor.

Die vorliegende Erfindung kann verwendet werden zum Zuführen von Impulsen mit hoher Spitzenleistung ($> 1 \text{ kW}$) über einen Lichtwellenleiter zu einem in einem Meßsystem befindlichen Testmuster wie beispielsweise ein gefärbtes biologisches Gewebe für eine Zwei-Photonen-Konfokalmikroskopie oder zu der Oberfläche eines Objekts, so daß dessen Position durch ein Autokorrelationsverfahren gemessen werden kann.

Darüber hinaus kann das Lichtwellenleiterzuführungssystem gemäß der vorliegenden Erfindung einen Frequenzumsetzer entweder vor oder nach dem Zuführungslichtwellenleiter aufweisen. Der Frequenzumsetzer ermöglicht eine effiziente Zuführung optischer Impulse mit von der durch die Laserquelle erzeugten Frequenz abweichenden Frequenzen zu der optischen Vorrichtung.

Ein gechirpter periodisch gepolter nichtlinearer Frequenzumsetzer wie beispielsweise ein periodisch gepoltes Lithium-Niobat-Kristall (PPLN) kann sowohl als Frequenzumsetzer als auch als Expander (oder Kompressor) verwendet werden. Das PPLN ermöglicht ein Erzeugen eines Impulses mit gegenüber dem einfallenden Impuls verdoppelter Frequenz, wobei der Frequenzchirp des Kristalls so ausgestaltet werden kann, daß er gegebenenfalls an das Vorzeichen und die Betrag der Dispersion der Kompensationselemente angepaßt werden kann.

Die Erfindung wird nachstehend anhand bevorzugter Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die Zeichnungen näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 ein Diagramm einer Lichtwellenleiterzuführungsvorrichtung nach einem allgemeinen erfindungsgemäßen Ausführungsbeispiel;

Fig. 2 ein Diagramm einer Lichtwellenleiterzuführungsvorrichtung nach dem ersten erfindungsgemäßen Ausführungsbeispiel;

Fig. 3 ein Diagramm einer Lichtwellenleiterzuführungsvorrichtung nach dem zweiten erfindungsgemäßen Ausführungsbeispiel;

Fig. 4 ein Diagramm einer Lichtwellenleiterzuführungsvorrichtung nach dem dritten erfindungsgemäßen Ausführungsbeispiel; und

Fig. 5 ein Diagramm einer weiteren Anordnung einer Lichtwellenleiterzuführungsvorrichtung nach dem dritten erfindungsgemäßen Ausführungsbeispiel.

Fig. 1 zeigt den Aufbau einer Lichtwellenleiterzufüh-

rungsvorrichtung nach einem allgemeinen erfindungsgemäßen Ausführungsbeispiel. Gemäß Fig. 1 erzeugt eine optische Impulsquelle 10 optische Impulse mit hoher Spitzenleistung. Die optische Impulsquelle 10 kann beispielsweise ein passiver modenverriegelter Faserlaser sein und einen Oszillator und einen Verstärker umfassen. Die durch die optische Impulsquelle 10 erzeugten ultrakurzen optischen Impulse weisen eine Impulsbreite auf, die weniger als 100 ps betragen kann, und eine Spitzenleistung, die mehr als 1 kW betragen kann. Vorzugsweise wird ein Erbium-dotierter Faserlaser verwendet, da die Wellenlänge (1,55 μm) des durch diesen erzeugten Lichts sowohl für die Verwendung in Lichtwellenleitern mit positiver und negativer Dispersion als auch in Lichtwellenleitern mit geringer Dispersion geeignet ist.

Die optischen Impulse werden von der optischen Impulsquelle 10 in einen Impulsspreizer oder Impulsexpander 20 eingegeben. Der Impulsexpander 20 kann eines der nachfolgenden Elemente aufweisen: einen Lichtwellenleiter, gechirpte Lichtwellenleiter-Bragg-Gitter, ein Beugungsgitterpaar oder ein Prismenpaar. Der Impulsexpander 20 verbreitert die Impulsbreite der einfallenden optischen Impulse, wobei gechirpte optische Impulse gebildet werden. Aufgrund der Verbreiterung der Impulsbreite wird die Spitzenleistung der optischen Impulse verringert. Die gespreizten optischen Impulse werden danach über einen Monomode- oder Einzelmodenlichtwellenleiter 30 übertragen, der die optischen Impulse einer gewünschten Stelle zuführt. Der Einzelmodenlichtwellenleiter ist gegenüber dem Multimodelichtwellenleiter dahingehend bevorzugt, daß die verschiedenen Moden eines Multimodelichtwellenleiters unterschiedliche Ausbreitungslängen aufweisen, was zu einer Impulsaufteilung führt.

Einzelmodenlichtwellenleiter sind typischerweise nicht für die Übertragung optischer Impulse mit hoher Spitzenleistung geeignet, da die hohe Spitzenleistung zu durch starke nichtlineare Effekte hervorgerufenen Verzerrungen führt, wodurch die Spitzenleistung verringert wird.

Der Aufbau des allgemeinen Ausführungsbeispiels führt zu einer Vermeidung dieses Problems, da die hohe Spitzenleistung der durch die optische Impulsquelle 10 erzeugten optischen Impulse vor dem Einführen der Impulse in den Einzelmodenlichtwellenleiter 30 verringert wird. D.h., die Spitzenleistung der optischen Impulse wird bei der Impulsverbreiterung durch den Impulsexpander 20 verringert. Folglich werden die optischen Impulse durch nichtlineare Effekte kaum verzerrt und erleiden bei der Ausbreitung über den Einzelmodenlichtwellenleiter 30 keine Verringerung der Spitzenleistung.

Ein Kompressor 40 dient zum Komprimieren der Impulsbreite der über den Einzelmodenlichtwellenleiter 30 übertragenen optischen Impulse. Bei dem allgemeinen Ausführungsbeispiel kann der Kompressor durch einen Lichtwellenleiter, ein Beugungsgitterpaar, gechirpte Lichtwellenleiter-Bragg-Gitter oder ein Prismenpaar gebildet sein. Es ist auch möglich, daß der Lichtwellenleiter 30 selbst den Kompressor bildet. In diesem Fall muß der Chirp (d. h. die Dispersion) innerhalb der Länge des Einzelmodenlichtwellenleiters 30 und durch die optische Vorrichtung 50 umgekehrt gleich dem in den Lichtwellenleiter 30 eingegebenen sein (d. h. gleich und umgekehrt zu dem durch die optische Impulsquelle 10 und/oder den Impulsexpander 20 hervorgerufenen Chirp). Dementsprechend kann die Länge des Einzelmodenlichtwellenleiters 30 so ausgestaltet werden, daß die Gesamtdispersion des Systems von der optischen Impulsquelle 10 zu der optischen Vorrichtung 50 kompensiert wird. Der Einzelmodenlichtwellenleiter 30 weist gegenüber dem Impulsexpander 20 eine umgekehrte und vorzugsweise eine

hohe Dispersion auf, um die Länge hinsichtlich der nichtlinearen Effekte zu minimieren. Die optische Vorrichtung 50 weist eine bekannte Dispersion auf, wodurch die abschließende Kompression der Impulse mit hoher Spitzenleistung in einem gewünschten Punkt innerhalb der optischen Vorrichtung 50 bereitgestellt wird, wie beispielsweise dem Meßpunkt oder an dem Detektor.

Obwohl die optische Impulsquelle 10 und der Expander 20 in Fig. 1 als getrennte Einheiten dargestellt sind, kann auch die optische Impulsquelle 10 gechirpte optische Impulse erzeugen, so daß kein getrennter Impulsexpander erforderlich ist. D.h., die durch eine solche Laserquelle erzeugten gechirpten optischen Impulse können Spitzenleistungs- und Impulsbreiteigenschaften aufweisen, die keinen getrennten Expander 20 zum Expandieren der Impulsbreite und zum Reduzieren der Spitzenleistung erforderlich machen.

Die Vorrichtung gemäß dem allgemeinen Ausführungsbeispiel löst zwei Schlüsselprobleme. Erstens wird die Dispersion des Zuführungslichtwellenleiters kompensiert, so daß die kürzeste Impulsdauer (und die höchste Spitzenleistung) an dem gewünschten Punkt in der optischen Vorrichtung 50 erzielt werden kann, wie beispielsweise an einem Meßpunkt oder an einem Detektor. Zweitens werden durch das Lichtwellenleiterzuführungssystem optische Impulse mit hoher Spitzenleistung ohne durch die auf Impulse mit hoher Spitzenleistung in Lichtwellenleitern einwirkenden nichtlinearen Effekte hervorgerufene Verzerrungen zugeführt.

Insbesondere das Einsetzen nichtlinearer Effekte wie beispielsweise eine Raman-Erzeugung und Eigenphasenmodulation führen zu einer Verzerrung und Verbreiterung optischer Impulse. In Lichtwellenleitern kann die nachteilige Wirkung dieser Einwirkungen vernachlässigt werden, falls die Dispersionslänge $L_d = T_0^2/|\beta_2|$ eines Impulses in einem Lichtwellenleiter kürzer ist als die nichtlineare Länge $L_N = 1/gP_0$; $L_d/L_N < 1$, wobei $|\beta_2|$ die Größe des Faserdispersionskoeffizienten kennzeichnet, λ den Nichtlinearitätskoeffizienten des Lichtwellenleiters, P_0 die Spitzenleistung des Laserimpulses und T_0 die Dauer des komprimierten Impulses. Die Dispersionslänge L_d und die nichtlineare Länge L_N stellen die Längenwerte bereit, ab denen die dispersiven oder nichtlinearen Wirkungen bei der Impulsentwicklung entlang eines Lichtwellenleiters Bedeutung erlangen. Mit anderen Worten werden Impulse viel schneller gedehnt oder komprimiert als die nichtlinearen Effekte zeitliche und spektrale Verzerrungen hervorrufen, wenn die Dispersionslänge kürzer ist als die nichtlineare Länge.

Laserimpulse mit einer Spitzenleistung von > 1 kW können sich in einem Lichtwellenleiter nicht mit geringer Dispersion ausbreiten, da $L_d/L_N > 1$. Durch Übertragen eines gechirpten Impulses (d. h. eines Impulses, der durch die optischen Impulsquelle 10 oder den Impulsexpander 20 gespreizt wurde) wird die Spitzenleistung verringert, wodurch sich die nichtlineare Länge ohne Veränderung der Dispersionslänge vergrößert. Dann kann beispielsweise ein Lichtwellenleiter mit beachtlicher Lichtwellenleiterdispersion (kurzer Dispersionslänge) zur Rekompensation des Impulses verwendet werden. Folglich ist der optische Impuls lediglich am Ende des Lichtwellenleiters kurz und weist dort eine hohe Spitzenleistung auf.

Durch die vorliegende Erfindung kann eine Dispersionskompensation für positive oder negative Dispersionseffekte bereitgestellt werden. Dies ermöglicht eine flexible Optimierung, die an den optischen Weg des Systems angepaßt werden kann, so daß ein Systembenutzer die geeignete Vorabkompensation für ein einstellbares System wie beispielsweise Mikroskopobjektive in einem Turmaufbau eines

Zwei-Photonen-Laserabtastrmikroskops bereitstellen kann. Solche Verfahren führen sowohl zu einer erhöhten Flexibilität, Robustheit und Zuverlässigkeit der Systemausgestaltung als auch zu einem verbesserten Signal-Rausch-Verhältnis und einer verbesserten Auflösung des Gesamtsystems.

Das erfindungsgemäße Kompensationsverfahren kann bei einer beispielhaften Betrachtung eines Erbium-dotierten modenverriegelten optischen Faserlasers erläutert werden. Die Emissionswellenlänge dieses Lasertyps beträgt ungefähr 1550 nm, was bei der Ausbreitung in einem Standard-einzelmodenlichtwellenleiter zu einer anormalen oder negativen Dispersion führt. Der Nulldispersionspunkt (zwischen beiden Dispersionsbereichen) befindet sich ungefähr bei 1300 nm. In der Umgebung des Nulldispersionspunkts kann jedoch eine starke Wellenleiterdispersion auftreten. Es ist sogar möglich, das Vorzeichen der bei 1550 nm auftretenden Dispersion durch geeignete Wellenleiterausgestaltung umzukehren. Daher können Lichtwellenleiter beider Dispersionsvorzeichen hergestellt werden. Bei einer Erbium-dotierten modenverriegelten optischen Faserlaserausgestaltung ist es möglich, Lichtwellenleiter beider Dispersionsvorzeichen zu verwenden. Der Ausgangsimpuls kann daher so angepaßt werden, daß er eine bestimmte Restdispersion aufweist, die dann in Kombination mit einem Lichtwellenleiter in dem Zuführungsweg so optimiert werden kann, daß sie umgekehrt gleich zu der in der optischen Vorrichtung 50 auftretenden Dispersion ist.

Zum Erzielen optischer Impulse mit sehr hoher Spitzenleistung kann ein Lichtwellenleiterzuführungssystem mit gechirpter Impulsverstärkung (CPA) eingesetzt werden, bei dem ein Verstärker zwischen der Vorkompensationsstufe (Expandierung) und der Kompressionsstufe verwendet wird, wobei das System als Lichtwellenleiterzuführung zu einer Meßvorrichtung für bestimmte Anwendungen verwendet werden kann. In dem optischen CPA-Lichtwellenleiterzuführungssystem wird ein Einzelwegverstärker und eine polarisationsbeibehaltende Verstärkerfaser als Zuführungsfaser verwendet, falls die Polarisation am Ausgang beibehalten werden muß, was normalerweise der Fall ist. Durch Verwendung der CPA ermöglicht das erfindungsgemäße optische Lichtwellenleiterzuführungssystem das Zuführen optischer Impulse mit Spitzenleistungen zwischen 2×10^4 und 7×10^7 Watt.

In vielen Fällen muß die Frequenz des durch die optische Impulsquelle 10 erzeugten Lichts vor dem Auftreffen auf die Meßprobe in eine andere Frequenz umgesetzt werden. Dementsprechend kann das erfindungsgemäße Lichtwellenleiterzuführungssystem ein Frequenzumsetzungskristall aufweisen.

Fig. 2 zeigt den Aufbau einer Lichtwellenleiterzuführungsvorrichtung nach dem ersten erfindungsgemäßen Ausführungsbeispiel. Gemäß Fig. 2 werden optische Impulse der optischen Impulsquelle 10 in ein gechirptes PPLN 60 eingeführt, in dem sowohl eine Frequenzumsetzung als auch eine Impulsverbreiterung durchgeführt wird.

Bei einem gechirpten PPLN 60 handelt es sich um einen gechirpten periodisch gepolten nichtlinearen Frequenzumsetzer. Die Verwendung von gechirpten quasiphasenangepaßten Gittern zur Rekompensation ultrakurzer Impulse während der Verdopplung wurde zuerst in Gesprächen durch Byer (CLEO Pacific Rim July '95) vorgeschlagen, danach durch Fejer (CLEO Mai '96) und schließlich detaillierter durch Arbore, Fejer, Harter, Marco und Fermann (CNOM Annual meeting Sept. '96). Die Fähigkeit zur Chirpkompensation und Frequenzumsetzung in einem gechirpten quasiphasenangepaßten (QPM) Kristall basiert auf zwei Schlüsselmerkmalen solcher Kristalle. Erstens sind die Gruppengeschwindigkeiten des Eingangsgrundimpulses und des fre-

quenzgewandelten Ausgangsimpulses entlang desselben Ausbreitungswegs unterschiedlich, wie typischerweise in jedem nichtlinearen Substratmaterial. Dies führt zu einem zeitweisen Auseinanderlaufen dieser Impulse. Zweitens kann ein quasiphasenangepaßtes Kristall so ausgestaltet sein, daß die Frequenzsetzung (z. B. Erzeugung der zweiten Harmonischen) für verschiedene Eingangswellenlängen an unterschiedlichen räumlichen Positionen entlang des Impulsausbreitungswegs stattfindet. Dies kann durch Verwenden von gechirpten anstelle üblicher ungechirpter QPM-Gittern erzielt werden. Ein in ein solches Kristall eintretender bandbreitenbegrenzter Impuls mit einer Grundwellenlänge erzeugt frequenzgewandelte (zweitharmonische) Impulse mit einem Frequenzchirp. Dieser Frequenzchirp kann durch die Ausgestaltung des Kristalls so gewählt werden, daß er mit dem Vorzeichen und dem Betrag der Dispersion der Kompensationselemente übereinstimmt.

Die Dauer dieser zweitharmonischen Impulse (SH) ΔT wird durch den Betrag des Gruppengeschwindigkeitsauseinanderlaufens bestimmt: $\Delta T = L/V_{SH} - L/V_{FUND}$. Hierbei kennzeichnet L die Länge des Kristalls und v_{SH} , v_{FUND} die Gruppengeschwindigkeiten der Wellenlängen der zweiten Harmonischen bzw. der Grundwelle. Die Frequenzbandbreite $\Delta\omega$ des SH-Impulses ist durch den Betrag der QPM-Periodenschwankung (Chirpbandbreite) gegeben. Die zum Kompensieren dieses Frequenzchirps erforderliche Dispersion beträgt $\Delta T/\Delta\omega$. Das Einkoppeln von Grundimpulsen aus zwei gegenüberliegenden Richtungen führt zu zweitharmonischen Impulsen mit umgekehrten Vorzeichen des Frequenzchirps.

Bei dem gechirpten PPLN 60 handelt es sich um ein Kristall mit einem gechirpten Gitter mit umgekehrtem Bezirk, das durch elektrische Feldpolung induziert ist. Bei einem 1550 nm-Pumpen und einer zweiten Harmonischen von 780 nm beträgt das Gruppengeschwindigkeitsauseinanderlaufen ungefähr 300 fs/mm. Die Bandbreite eines gechirpten PPLN kann einige zehn Nanometer betragen. Dies reicht zum Erzeugen vorgespreizter zweitharmonischer Impulse aus, die in einem optischen System unter Verwendung von ungefähr einem bis zu einigen Metern Lichtwellenleiter weiter kompensiert werden können.

Fig. 3 zeigt den Aufbau einer Lichtwellenleiterzuführungsvorrichtung nach dem zweiten erfindungsgemäßen Ausführungsbeispiel. In Fig. 3 werden die optischen Impulse durch eine gechirpte optische Impulsquelle 11 mit einem zum Vermeiden signifikanter, in dem Einzelmodenlichtwellenleiter 30 auftretender Nichtlinearitäten ausreichenden Chirp erzeugt. Ein gechirpter PPLN 70 ist nach dem Einzelmodenlichtwellenleiter 30 angeordnet. Folglich wird die Grundfrequenz durch den Einzelmodenlichtwellenleiter 30 übertragen und der gechirpte PPLN 70 kompensiert den Chirp der gechirpten optischen Impulsquelle 11 und des Einzelmodenlichtwellenleiters 30. Ein Vorteil der Verwendung eines PPLN sowohl zur Frequenzumsetzung als auch zur Impulskompression liegt darin, daß der Meßvorrichtung Impulse mit noch höherer Spitzenleistung und der frequenzgewandelten Wellenlänge zugeführt werden können, aufgrund der Tatsache, daß das frequenzgewandelte Licht nicht in den Lichtwellenleiter zurückgeführt wird.

Im Gegensatz dazu ist es bei Laserquellen ohne Chirp wie beispielsweise der optischen Impulsquelle des ersten Ausführungsbeispiels (Fig. 2) vorteilhaft, zuerst eine Frequenzumsetzung mit einem gechirpten quasiphasenangepaßten Gitter (PPLN 60) durchzuführen. Danach rekompriert der Einzelmodenlichtwellenleiter 30 den Chirp des frequenzgewandelten Impulses.

Somit kann ein PPLN entweder vor oder nach oder bei einer Vielzahl von Frequenzumsetzungsvorrichtungen an bei-

den Enden des Lichtwellenleiters angeordnet werden. Der Vorteil des gechirpten quasiphasenangepaßten Materials liegt darin, daß der geeignete Chirp in das Material konstruiert werden kann.

Fig. 4 zeigt den Aufbau einer Lichtwellenleiterzuführungsvorrichtung nach dem dritten erfindungsgemäßen Ausführungsbeispiel. Gemäß Fig. 4 ist ein Frequenzumsetzer 80 zwischen die optische Impulsquelle 10 und den Expander 20 geschaltet, so daß der Frequenzumsetzer 80 die Frequenz vor der Übertragung über den Einzelmodenlichtwellenleiter 30 ändert. Der Frequenzumsetzer 80 ändert die Frequenz des Lichts, so daß der zu der optischen Vorrichtung 50 übertragene optische Impuls die für die optische Vorrichtung 50 geeignete Frequenz aufweist. Fig. 5 zeigt eine weitere Anordnung der Lichtwellenleiterzuführungsvorrichtung nach dem dritten erfindungsgemäßen Ausführungsbeispiel. In Fig. 5 ist der Frequenzumsetzer 80 zwischen den Kompressor 40 und die optische Vorrichtung 50 geschaltet.

Gemäß den Fig. 4 und 5 kann der Frequenzumsetzer 80 entweder vor oder nach dem Zuführungslichtwellenleiter angeordnet sein. In einigen Systemen ist es bevorzugt, den Frequenzumsetzer vor dem Lichtwellenleiter anzuordnen, da die Frequenzumsetzung üblicherweise einen Wirkungsgrad von weniger als 50% aufweist und dieser geringe Wirkungsgrad die Spitzenleistung und damit die in dem Lichtwellenleiter auftretenden Nichtlinearitäten verringert. In anderen Systemen ist es bevorzugt, den Frequenzumsetzer nach dem Lichtwellenleiter anzuordnen, da der Lichtwellenleiter bei der Wellenlänge Erbium-dotierter optischer Faserlaser dann eine positive und negative Dispersion aufweisen kann, so daß ein spezieller Lichtwellenleiter für die Dispersionskompensation verwendet werden kann. Die häufigste Frequenzumsetzung ist die Frequenzverdoppelung; dieses Lichtwellenleiterzuführungssystem kann jedoch auch mit einer optischen Parametererzeugung (OPG) und einer optischen Parameterverstärkung (OPA) und auch mit einer Kombination einer Mehrfachfrequenzumwandlung umfassend eine Verdopplung mit OPG, OPA und/oder Frequenzdifferenzmischung verwendet werden.

Der Frequenzumsetzer des vierten und fünften Ausführungsbeispiels kann mit dem vorstehend beschriebenen Erbium-dotierten modenverriegelten optischen Faserlaser verwendet werden. Im einzelnen kann die Laserquelle frequenzverdoppelt sein, um optische Impulse mit einer Wellenlänge von ungefähr 780 nm unter Verwendung eines Verdopplungskristalls zu erzeugen. Diese Impulse mit kürzerer Wellenlänge sind zu den durch die Laserquelle erzeugten 1550 nm-Eingangsimpulsen kohärent, wodurch die Phaseninformation der Eingangsimpulse beibehalten wird. Folglich ist es möglich, den ultrakurz gepulsten Oszillator und den Zuführungslichtwellenleiter zum Vorabkompensieren der auf das 780 nm-Licht in dem optischen Weg des Meß- oder Bilderzeugungssystems einwirkenden Dispersion bei 1550 nm auszugestalten. Dies ist wichtig, da das im Bereich von 780 nm erzeugte Licht, wie bereits erwähnt, in optischen Komponenten 1 eine Dispersion mit lediglich einem Vorzeichen erfährt und es daher unmöglich ist, die hier beschriebene Art der flexiblen Kompensation ohne die Möglichkeit des Rückgriffs auf beide Dispersionsvorzeichen durchzuführen.

Die Lichtwellenleiterzuführung des Ausgangs einer Laserquelle weist einige Vorteile auf. Diese umfassen die Möglichkeit des Beibehaltens einer gleichbleibenden Ausrichtung und einer räumlichen Filterung einer Multimodeeingabe bei der Verwendung eines Einzelmodenquellenleiters für die Eingabewellenlänge. Die Lichtwellenleiterzuführung eines Eingangssignals zu einem optischen System weist diese Vorteile auf und ermöglicht eine einfache Ände-

rung der Eingabe durch Ändern eines Lichtwellenleiteranschlußstücks (Pigtail). Wie bereits erwähnt, können Lichtwellenleiter in Abhängigkeit der eingekoppelten Wellenlänge und der Lichtwellenleiterausgestaltung unterschiedliche Dispersionsvorzeichen aufweisen. Daher ermöglicht ein dem Ausgang eines Lasers hinzugefügtes Lichtwellenleiteranschlußstück (Pigtail) eine weitere Kompensation der entstehenden Dispersionsart, während eine vereinfachte Ausrichtung bezüglich einem optischen System möglich ist. Dadurch ist auch ein während der Herstellung der Ultrakurzimpuls-laserquelle vorkalibriertes Einstellen durch den Anwender möglich.

Zusammenfassend werden eine Vorrichtung und ein Verfahren zum Zuführen eines Impulses mit hoher Spitzenleistung zu einer optischen Vorrichtung über einen Lichtwellenleiter offenbart, wobei eine ultrakurz gepulste Laserquelle zum Erzeugen ultrakurzer optischer Impulse mit hoher Spitzenleistung vorgesehen ist. Vor der Übertragung der optischen Impulse über einen Zuführungslichtwellenleiter wird die Impulsbreite der optischen Impulse expandiert, wobei gechirpte optische Impulse mit geringer Spitzenleistung erzeugt werden. Die expandierten Impulse werden über den Lichtwellenleiter zum Zuführen der Impulse zu einer ultrakurzen optischen Impulse mit hoher Spitzenleistung erfordernden optischen Vorrichtung übertragen. Der Lichtwellenleiter und/oder eine an das Ende des Lichtwellenleiters gekoppelte Ausgabereinheit bewirken eine Dispersion, die die durch die gepulste Laserquelle und einen Expander hervorgerufene Dispersion kompensiert, und führen der optischen Vorrichtung einen rekomprimierten optischen Impuls zu. Das Lichtwellenleiterzuführungssystem führt vorzugsweise eine Vorkompensation der durch die optischen Komponenten der optischen Vorrichtung bewirkten Dispersion durch, so daß die optischen Impulse an einem betrachteten Punkt innerhalb der optischen Vorrichtung, wie beispielsweise an einem Muster oder an einem Detektor, vollständig rekomprimiert sind. Das Lichtwellenleiterzuführungssystem kann einen Frequenzumsetzer entweder vor oder nach dem Zuführungslichtwellenleiter aufweisen. Der Frequenzumsetzer ermöglicht ein Zuführen optischer Impulse mit einer von der durch die Laserquelle erzeugten Frequenz abweichenden Frequenz zu der optischen Vorrichtung in effizienter Weise.

Patentansprüche

1. Vorrichtung zum Zuführen ultrakurzer optischer Impulse mit hoher Spitzenleistung zu einer optischen Vorrichtung (50), mit:
 - a) einem Impulsexpander (20) zum Empfangen ultrakurzer optischer Impulse mit hoher Spitzenleistung und zum Expandieren der Impulsbreite der optischen Impulse; und
 - b) einem Lichtwellenleiter (30) zum Übertragen der optischen Impulse über eine gewünschte Länge, wobei der Lichtwellenleiter eine Dispersion aufweist, durch die andere in der Vorrichtung auftretende und die optischen Impulse beeinflussende Dispersionsarten kompensiert werden, so daß die optischen Impulse an einem gewünschten Punkt der optischen Vorrichtung vollständig rekomprimiert sind.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, wobei der Impulsexpander (20) ein gechirptes optisches Faser-Bragg-Gitter, ein Beugungsgitterpaar oder ein Prismenpaar ist.
3. Vorrichtung nach Anspruch 1, wobei der Lichtwellenleiter (30) ein Einzelmodenlichtwellenleiter ist.
4. Vorrichtung nach Anspruch 1, wobei der Lichtwellenleiter (30) ein verstärkender Lichtwellenleiter ist.

5. Vorrichtung nach Anspruch 1, wobei der Lichtwellenleiter (30) die Impulsbreite des über diesen übertragenen optischen Impulses komprimiert, um der optischen Vorrichtung (50) optische Impulse mit hoher Spitzenleistung zuzuführen, so daß die optischen Impulse an einem gewünschten Punkt in der optischen Vorrichtung vollständig rekomprimiert sind. 5
6. Vorrichtung nach Anspruch 1, weiterhin umfassend einen Impulskompressor (40) zum Komprimieren der Impulsbreite der über den Lichtwellenleiter (30) übertragenen optischen Impulse, so daß die optischen Impulse an einem gewünschten Punkt in der optischen Vorrichtung (50) vollständig rekomprimiert sind. 10
7. Vorrichtung nach Anspruch 1, wobei der Impulskompressor (40) ein gechirptes optisches Faser-Bragg-Gitter, ein Beugungsgitterpaar oder Prismenpaar ist. 15
8. Vorrichtung nach Anspruch 1, wobei die optische Vorrichtung (50) ein zum Analysieren einer Meßprobe verwendetes Zwei-Photonen-Laserabtastmikroskop ist. 20
9. Vorrichtung nach Anspruch 8, wobei der Lichtwellenleiter (30) eine durch das Mikroskop verursachte Dispersion kompensiert, so daß die optischen Impulse an der Meßprobe vollständig rekomprimiert sind.
10. Vorrichtung nach Anspruch 1, weiterhin umfassend einen stromabwärts der optischen Impulsquelle angeordneten Frequenzumsetzer (80), wobei der Frequenzumsetzer eine Frequenz des durch die optische Impulsquelle erzeugten optischen Impulses in eine von der optischen Vorrichtung (50) geforderte Frequenz umsetzt. 30
11. Vorrichtung zum Zuführen ultrakurzer optischer Impulse mit hoher Spitzenleistung zu einer optischen Vorrichtung (50), mit:
 - a) einem periodisch gepolten nichtlinearen Frequenzumsetzer (60) zum Empfangen der ultrakurzen optischen Impulse mit hoher Spitzenleistung, wobei der periodisch gepolte nichtlineare Frequenzumsetzer die Impulsbreite der optischen Impulse expandiert und die Frequenz der optischen Impulse ändert; und 35
 - b) einem Lichtwellenleiter (30) zum Übertragen der optischen Impulse über eine gewünschte Länge, wobei der Lichtwellenleiter eine Dispersion aufweist, durch die andere in der Vorrichtung auftretende und die optischen Impulse beeinflussende Dispersionen kompensiert werden, so daß die optischen Impulse an einem gewünschten Punkt in der optischen Vorrichtung (50) vollständig rekomprimiert sind. 40 45 50
12. Vorrichtung nach Anspruch 11, wobei der Lichtwellenleiter (30) ein Einzelmodenlichtwellenleiter ist.
13. Vorrichtung nach Anspruch 11, wobei der Lichtwellenleiter (30) ein verstärkender Lichtwellenleiter ist. 55
14. Vorrichtung nach Anspruch 11, wobei der Lichtwellenleiter (30) die Impulsbreite der über diesen übertragenen optischen Impulse komprimiert, um der optischen Vorrichtung (50) optische Impulse mit hoher Spitzenleistung zuzuführen, so daß die optischen Impulse an einem gewünschten Punkt in der optischen Vorrichtung (50) vollständig rekomprimiert sind. 60
15. Vorrichtung nach Anspruch 11, weiterhin umfassend einen Impulskompressor (40) zum Komprimieren der Impulsbreite der über den Lichtwellenleiter (30) übertragenen optischen Impulse, so daß die optischen Impulse an einem gewünschten Punkt in der optischen Vorrichtung (50) vollständig rekomprimiert sind. 65

16. Vorrichtung nach Anspruch 15, wobei der Impulskompressor (40) ein gechirptes optisches Faser-Bragg-Gitter, ein Beugungsgitterpaar oder ein Prismenpaar ist.
17. Vorrichtung nach Anspruch 11, wobei die optische Vorrichtung (50) ein zum Analysieren einer Meßprobe verwendetes Zwei-Photonen-Laserabtastmikroskop ist.
18. Vorrichtung nach Anspruch 17, wobei der Lichtwellenleiter (30) eine durch das Mikroskop verursachte Dispersion kompensiert, so daß die optischen Impulse an der Meßprobe vollständig rekomprimiert sind.
19. Vorrichtung nach Anspruch 11, wobei der periodisch gepolte nichtlineare Frequenzumsetzer ein periodisch gepoltes Lithium-Niobat-(PPLN)-Kristall (60) ist.
20. Vorrichtung zum Erzeugen ultrakurzer optischer Impulse mit hoher Spitzenleistung, mit:
 - a) einem Lichtwellenleiter (30) zum Empfangen gechirpter optischer Impulse und zum Übertragen der optischen Impulse über eine gewünschte Länge;
 - b) einem verstärkenden Medium zum Verstärken der optischen Impulse, wobei das verstärkende Medium eine Dispersion aufweist, die andere in der Vorrichtung auftretende und die optischen Impulse beeinflussende Dispersionen kompensiert; und
 - c) einem Impulskompressor umfassend einen periodisch gepolten nichtlinearen Frequenzumsetzer (70) zum Komprimieren der Impulsbreite der optischen Impulse und zum Ändern der Frequenz der optischen Impulse.
21. Vorrichtung zum Zuführen ultrakurzer optischer Impulse mit hoher Spitzenleistung zu einer optischen Vorrichtung (50), mit:
 - a) einem Lichtwellenleiter (30) zum Empfangen gechirpter optischer Impulse und zum Übertragen der optischen Impulse über eine gewünschte Länge; und
 - b) einem periodisch gepolten nichtlinearen Frequenzumsetzer (70) zum Empfangen der optischen Impulse des Lichtwellenleiters, wobei der periodisch gepolte nichtlineare Frequenzumsetzer die Impulsbreite der optischen Impulse komprimiert und die Frequenz der optischen Impulse ändert,
 - c) wobei der Lichtwellenleiter (30) eine Dispersion aufweist, die andere in der Vorrichtung auftretende und die optischen Impulse beeinflussende Dispersionen kompensiert, so daß die optischen Impulse an einem gewünschten Punkt in der optischen Vorrichtung (50) vollständig rekomprimiert sind.
22. Vorrichtung nach Anspruch 21, wobei der Lichtwellenleiter (30) ein verstärkender Lichtwellenleiter ist.
23. Vorrichtung nach Anspruch 21, wobei der Lichtwellenleiter (30) ein Einzelmodenlichtwellenleiter ist.
24. Vorrichtung nach Anspruch 21, wobei der Lichtwellenleiter (30) die Impulsbreite der über diesen übertragenen optischen Impulse komprimiert, um der optischen Vorrichtung (50) optische Impulse mit hoher Spitzenleistung zuzuführen, so daß die optischen Impulse an einem gewünschten Punkt in der optischen Vorrichtung (50) vollständig rekomprimiert sind.
25. Vorrichtung nach Anspruch 21, wobei die optische Vorrichtung (50) ein zum Analysieren einer Meßprobe

verwendetes Zwei-Photonen-Laserabtastmikroskop ist.

26. Vorrichtung nach Anspruch 25, wobei der Lichtwellenleiter (30) eine durch das Mikroskop verursachte Dispersion kompensiert, so daß die optischen Impulse an der Meßprobe vollständig rekomprimiert sind.

27. Vorrichtung nach Anspruch 21, wobei der periodisch gepolte nichtlineare Frequenzumsetzer ein periodisch gepoltes Lithium-Niobat-(PPLN)-Kristall (70) ist.

28. Verfahren zum Zuführen ultrakurzer optischer Impulse mit hoher Spitzenleistung zu einer optischen Vorrichtung, mit den Schritten:

a) Erzeugen ultrakurzer optischer Impulse mit hoher Spitzenleistung;

b) Expandieren einer Impulsbreite der optischen Impulse;

c) Übertragen der optischen Impulse über einen Lichtwellenleiter;

d) Komprimieren der Impulsbreite der über den Lichtwellenleiter übertragenen optischen Impulse durch Kompensieren einer Dispersion; und

e) Zuführen der optischen Impulse zu der optischen Vorrichtung.

29. Verfahren nach Anspruch 28, wobei der Kompressionsschritt eine in der optischen Vorrichtung verursachte Dispersion kompensiert.

30. Verfahren nach Anspruch 28, weiterhin umfassend den Schritt des Frequenzumsetzens einer Frequenz der in dem Erzeugungsschritt erzeugten optischen Impulse in eine für die optische Vorrichtung erforderliche Frequenz.

31. Verfahren nach Anspruch 30, wobei der Frequenzumsetzungsschritt vor dem Übertragungsschritt durchgeführt wird.

32. Verfahren nach Anspruch 30, wobei der Frequenzumsetzungsschritt nach dem Übertragungsschritt durchgeführt wird.

Hierzu 5 Seite(n) Zeichnungen

40

45

50

55

60

65

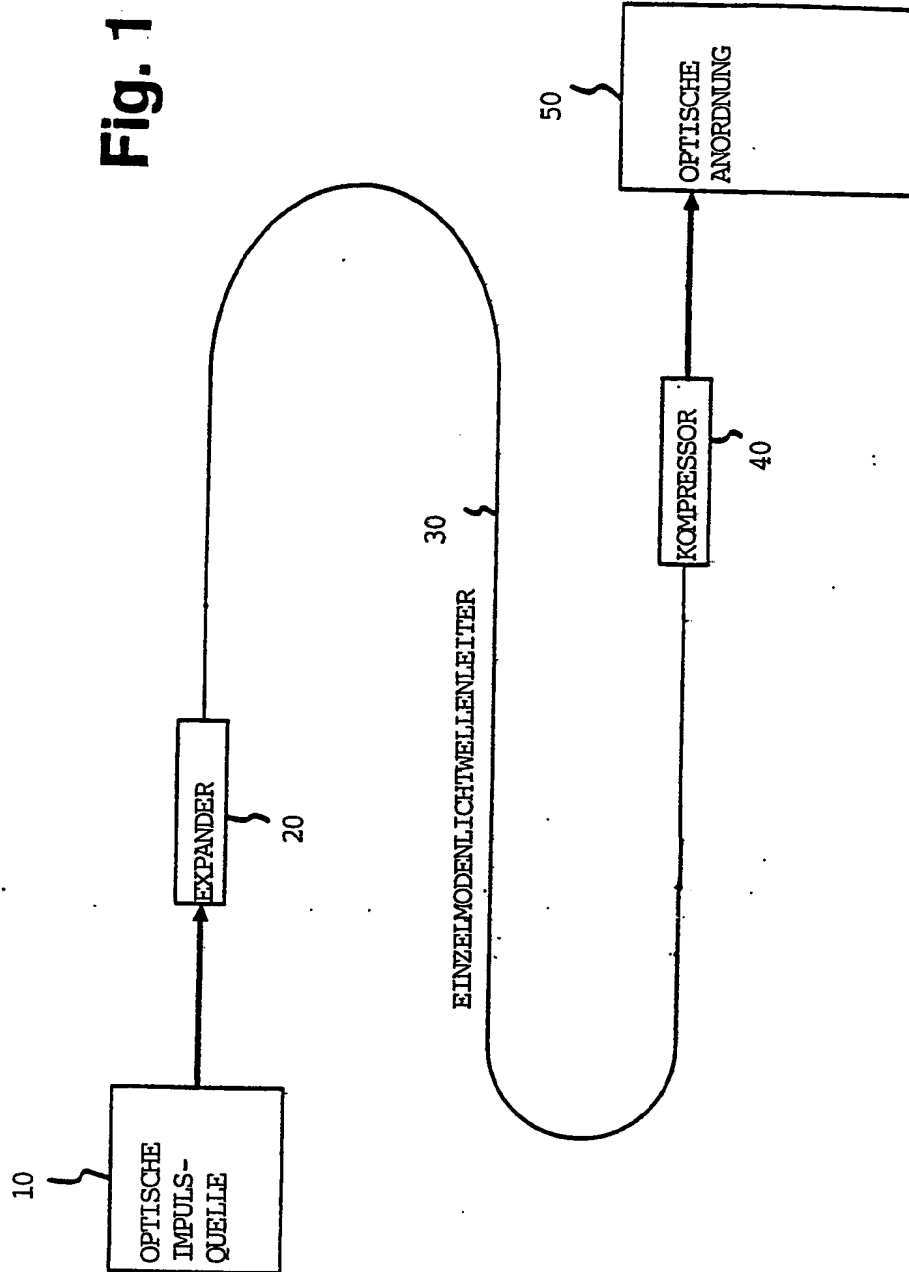


Fig. 2

